第 35 卷 第 4 期
2018 年 7 月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 35 No. 4
July 2018

doi:10.13866/j.azr.2018.04.01

地下防渗对滴灌棉花产量和水分利用率的影响①

胡治强， 侯振安， 闵 伟， 冶 军， 吴 颜
（石河子大学农学院资源与环境科学系，新疆 石河子 832003）

摘 要：过量灌溉导致土壤水分深层渗漏是滴灌农田水分无效损失的重要途径，地下防渗可有效减少土壤水分深层渗漏，提高农田水分利用效率。2015—2016 年通过田间试验研究不同灌水量下地下防渗对滴灌棉田水分平衡、棉花产量及水分利用率的影响。采用灌水量和地下防渗 2 因素 3 水平（3×3）试验设计，其中，3 个灌水量水平为 340、440 mm 和 540 mm；3 个地下防渗处理分别为：对照（无防渗）、地下防渗埋深 40 cm 和 60 cm。结果表明：地下防渗处理（埋深 40，60 cm）0～60 cm 土壤含水量和净贮水量显著高于对照。随灌水量增加，土壤水分深层渗漏损失量显著增加。灌水量 340 mm 条件下，地下防渗对水分渗漏量影响不显著。灌水量 440 mm 和 540 mm 条件下，地下防渗埋深 40 cm、60 cm 处理水分渗漏损失量较对照分别减少 64%、72% 和 38%、76%。低灌水量下（340 mm），地下防渗处理（埋深 40，60 cm）棉田蒸散量显著低于对照；而高灌水量下（540 mm），地下防渗埋深 60 cm 处理棉田蒸散量显著高于对照。中、低灌水量下（440，340mm），地下防渗处理棉花干物质重、产量、水分利用率和经济效益均显著高于对照；但地下防渗埋深 40 cm 和 60 cm 处理间差异不显著。高灌水量下（540 mm），地下防渗埋深 60 cm 显著提高棉花干物质重、产量、水分利用率和经济效益，地下防渗埋深 40 cm 处理与对照无显著差异。因此，中、低灌水量（440，340 mm）地下防渗埋深 40 cm 或 60 cm 均较适宜，而高灌水量（540 mm）采用地下防渗埋深 60 cm 较为适合。

关键词：膜下滴灌；地下防渗；灌水量；棉花产量；水分利用率

淡水资源紧缺是限制农业生产发展和生态环境改善的重要因素，尤其是在干旱半干旱地区[1]。新疆干旱区，年降雨量少，蒸发量大，作为我国最大的商品棉区。棉花生长所需水分主要依靠灌溉，水资源不足是新疆棉区农业生产中面临的关键问题之一[2-4]。提高农田水分利用效率，实现节水增产对于促进新疆棉花产业稳定发展具有重要意义。

农田水分消耗途径主要包括地表径流、深层渗漏、植物蒸腾和棵间蒸发等。减少农田水分的无效损失是提高水分利用率的重要途径。20 世纪 90 年代，新疆率先在棉花生产中大面积推广膜下滴灌技术，有效降低了农田水分的土壤蒸发和深层渗漏损失，为实现棉花节水增产发挥了重要作用。研究表明，滴灌条件下增加灌水量可延长灌水周期、促进棉花生长、提高产量，但水分深层渗漏损失显著增加[5-7]。滴灌棉田水分利用效率随灌水量增大而显著降低，减少滴灌水量虽然可以获得较高的水分利用效率，但会造成减产；而过量滴灌无明显增产效应，且淡水资源浪费严重[8]。地下防渗技术是在作物根区铺设聚乙烯防渗膜防止水分深层渗漏，将更多的土壤水分保持在根区，为作物生长发育及时供应所需的水分，从而提高水分利用效率，实现作物节水增产[9]。研究表明地下防渗技术可显著减少砂质土壤的水分深层渗漏损失，节水增产效果显著[10]。近年来，由于全球极端天气事件尤其是高温事件频发。加之新疆滴灌棉田配水系统和管理制度仍不够完善，农民为了避免干旱影响棉花生长，实际生产中过量灌溉现象普遍存在[11]。一方面，由于灌溉定额过大导致农田水分深层渗漏损失；另一方面，单次灌水定额过高也会导致水分深层渗漏。研究表明北疆膜下滴灌棉田适宜灌溉定额 450～500 mm 下，土壤水分深层渗漏（1 m 以下）损失占总灌水量的 4.97%～10.31%[12]。因此，减少土壤水分深层渗漏损失也是提高新疆滴灌棉田水分利用效率的重要途径。防渗膜埋设深度是地下防渗技术的基本参数，直接影响土壤水分运移和分布，从而影响作物生

① **收稿日期**：2017－09－29； **修订日期**：2018－01－08
基金项目：兵团中青年科技创新领军人才计划（2016BC001）
作者简介：胡治强（1992－），男，硕士研究生，从事土壤水氮高效利用研究. E-mail：huzhiqiang1004@126.com
通讯作者：侯振安. E-mail：hzatyl@163.com

长和产量。Guber 等[13]研究发现,不论何种防渗膜埋深和纵横比例,过量灌溉都会导致其防渗漏性能降低。因此,适宜的灌水量和防渗膜埋深对于地下防渗技术的合理应用至关重要。

本研究通过 2 a 田间定位试验,研究新疆膜下滴灌条件下不同灌水量和防渗膜埋深对土壤水分运移分布、棉花产量及水分利用率的影响,以期为提高膜下滴灌棉田水分利用效率提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况和供试材料

试验于 2015 - 2016 年在新疆石河子天业生态园进行(86°4′11″E,44°21′14″N)。研究区为典型温带干旱大陆性气候,年平均降水量为 210 mm,年均蒸发量 1 660 mm。2015—2016 年试验区的实际蒸散量和降水量情况见图 1。2015 年和 2016 年棉花生长期间的降雨量分别为 64 mm 和 140 mm。土壤类型为灌耕灰漠土,质地为壤土。砂粒 41.12%,粉粒 40.46%,黏粒 18.42%,pH8.57,有机质 11.27 g·kg^{-1},全氮 0.43 g·kg^{-1},铵态氮 1.09 mg·kg^{-1},硝态氮 12.40 mg·kg^{-1},有效磷 12.45 mg·kg^{-1},速效钾 317 mg·kg^{-1}。

试验中使用的地下防渗膜由聚乙烯和非渗透性材料制成,宽度 60 cm,厚度 0.076 mm(美国密歇根大学提供)。供试作物为棉花,品种为"新陆早 64 号"。

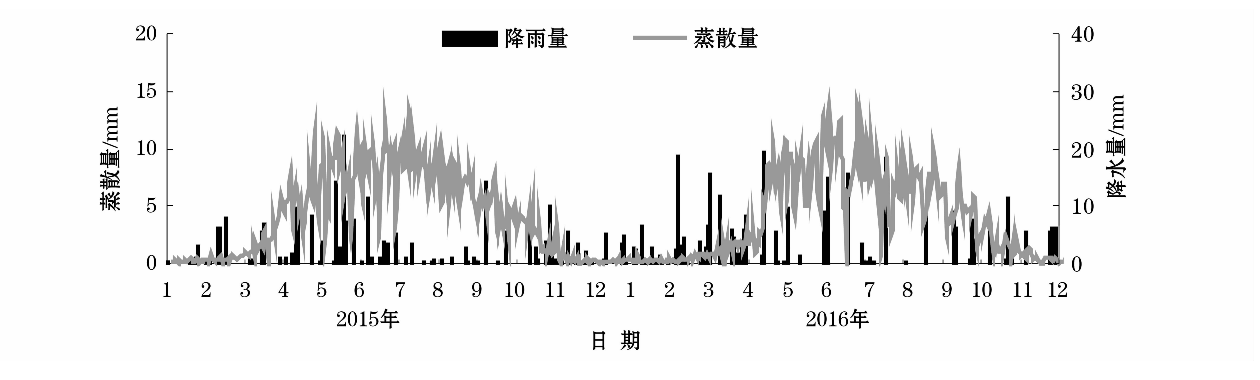


图 1 2015 年和 2016 年研究区降水量和潜在蒸发量

Fig. 1 Daily precipitation and reference evapotranspiration (ET0) at the experimental site from 2015 to 2016.

1.2 试验设计

设置田间小区定位试验,采用灌水量和地下防渗 2 因素 3 水平(3×3)试验设计。灌水量设 3 个水平:340、440 mm 和 540 mm(分别用 W340,W440 和 W540 表示)。地下防渗设置 3 个处理分别为:对照(无防渗膜)、防渗膜埋深 40 cm 和 60 cm(分别用 CK、D40 和 D60 表示)。试验共 9 个处理,每个处理重复 3 次,共 27 个试验小区,小区面积为 48 m^2。

棉花种植方式为膜下滴灌,滴灌带间距 90 cm,滴头流量为 2.6 L·h^{-1},滴头间距 40 cm。在 2015 年试验开始前,使用专用机械装备(带 GPS 定位)铺设防渗膜。考虑到滴灌条件下土壤水分渗漏损失主要发生在滴头下方,故防渗膜埋设位置位于滴灌带下方,深度为 40 cm(D40 处理)或 60 cm(D60 处理),宽度为 40 cm(图 2)。小区之间用塑料膜进行隔离(深度 1 m),防止小区之间水分侧渗。在每个试验小区埋设土壤水分深层渗漏接收装置,位于滴头正下方,深度为 1 m(图 2)。

棉花采用覆膜栽培,一膜 4 行,行距配置 30 cm +60 cm + 30 cm,株距 10 cm,种植密度为 2.22 × 10^5 株·hm^{-2}。2015 年和 2016 年棉花分别于 4 月 26 日和 4 月 28 日播种。棉花播种采用干播湿出,在播种后立即滴出苗水 30 mm(灌水量设计中不含出苗水)。棉花生长期间滴水 9 次,灌水周期为 7 ~ 12 d。试验中供试氮源为尿素,用量为 360 kg·N·hm^{-2}。其中,20% 做基肥,剩余 80% 在棉花生长期间分 5 次随水滴施(初花期前开始,吐絮期前结束)。供试磷、钾肥使用重过磷酸钙和硫酸钾,用量分别为 P_2O_5 10^5 kg·hm^{-2},K_2O 60 kg·hm^{-2},全部做基肥一次施入,其他栽培管理措施同当地大田生产。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量 每次灌水前 1 d 在采样区域随机选取 3 个采样点(采样点间隔 3 ~4 m)采集 0 ~

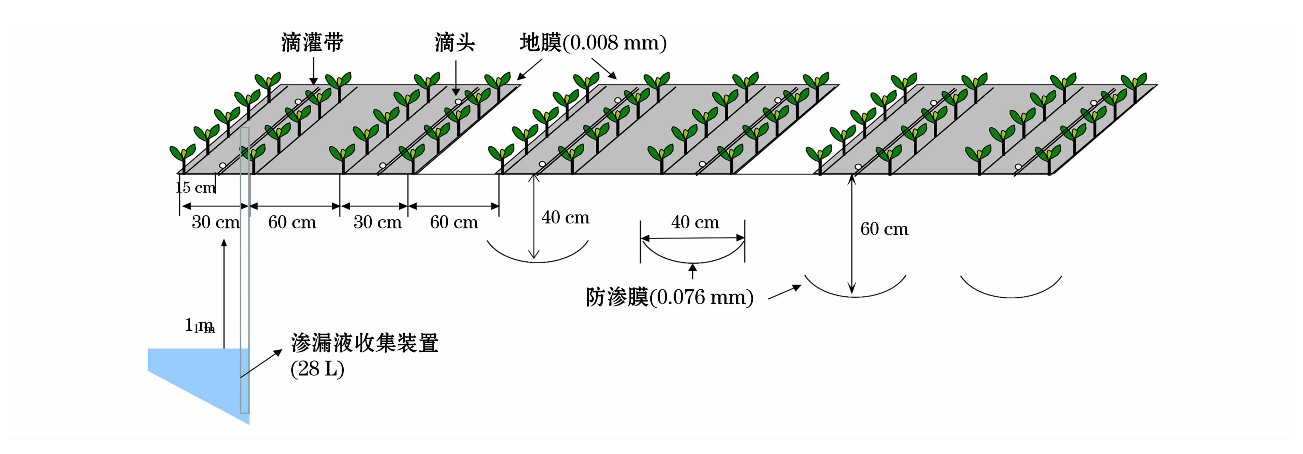


图 2　试验小区规划和装置布置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of three experimental field plots showing the plastic film much, row spacing, drip－irrigation lines, subsurface water retention membranes, and deep drainage collection system.

100 cm 土壤样品,每 20 cm 一层。采用传统烘干法测定土壤含水量。

1.3.2　土壤水分深层渗漏量　每次灌水后 2～3 d,通过渗漏接收装置收集渗漏水,测定渗漏水体积,计算农田水分渗漏量。

1.3.3　棉花干物质重和产量　在花铃期采集棉花植株地上部样品,每个试验小区取 3 株,分成茎、叶、蕾铃 3 部分,105 ℃杀青 30 min 后,于 70 ℃下烘干至恒重,称量植株干物质重。在吐絮期测定棉花籽棉产量及产量构成因素,最后实收计产。

1.4　数据计算与处理

1.4.1　数据计算　灌溉水利用率(IWUE, kg · m^{-3})采用下式计算[14]:

$$IWUE = \frac{Y - YD}{I} \tag{1}$$

式中:Y 为灌溉条件下棉花籽棉产量(kg · hm^{-2});YD 为无灌溉条件下棉花籽棉产量(kg · hm^{-2});I 为灌水量(mm)。研究区地处干旱地区,属灌溉农业区,因此无灌溉条件下棉花籽棉产量按 0 kg · hm^{-2} 计算。

农田水分利用率(WUE, kg · m^{-3})计算为作物产量(籽棉产量, kg · hm^{-2})与农田蒸散量(ET, mm)的比值[13]:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \tag{2}$$

式中:Y 为棉花籽棉产量(kg · hm^{-2});ET 为农田蒸散量(mm)。ET 依据作物生长期间的农田水分平衡方程计算:

$$ET = I + P + \Delta W - D - R \tag{3}$$

式中:I 为灌溉量(mm);P 为有效降水量(mm);ΔW 为 1.0 m 土壤净贮水量(mm);D 为土壤 1.0 m 以下水分渗漏量(mm);R 为地表径流量(滴灌条件下忽略地表径流)。

1.4.2　数据处理　数据计算和绘图用 Microsoft Excel 2003 软件进行。数据变异和方差分析采用 SPSS 11.5 统计分析软件进行($P < 0.05$)。

2　结果与分析

2.1　土壤含水量

2015 年和 2016 年棉花盛花期(第 3 次灌溉后 7 d),不同处理 0～100 cm 土壤含水量如图 3。W440 和 W540 处理的 0～100 cm 土壤平均含水量较 W340 处理分别增加 25% 和 35%。D40 和 D60 处理 0～100 cm 土壤含水量,在 W340 下较 CK 分别增加 11% 和 20%;在 W440 下分别增加 5% 和 12%;而在 W540 下 3 个地下防渗处理间差异不显著($P > 0.05$)。

从土壤含水量的垂直分布来看,3 个灌水量水平下,0～60 cm 土壤含水量均表现为 D60 > D40 > CK(除 W340 条件下 D40 和 D60 处理 0～20 cm 土壤含水量与 CK 差异不显著外);随着灌水量的增加,3 个地下防渗处理间 0～60 cm 土壤含水量的差异逐渐缩小。80～100 cm 土壤含水量表现为地下防渗处理(D40 和 D60)显著低于 CK。D40 和 D60 处理 80～100 cm 土壤含水量,在 W440、W340 下较 CK 处理 2 a 平均分别减少 14.1% 和 13.6%、20.7% 和 12.5%;而在 W540 下,较 CK 处理分别减少 9.6% 和 14.8%。

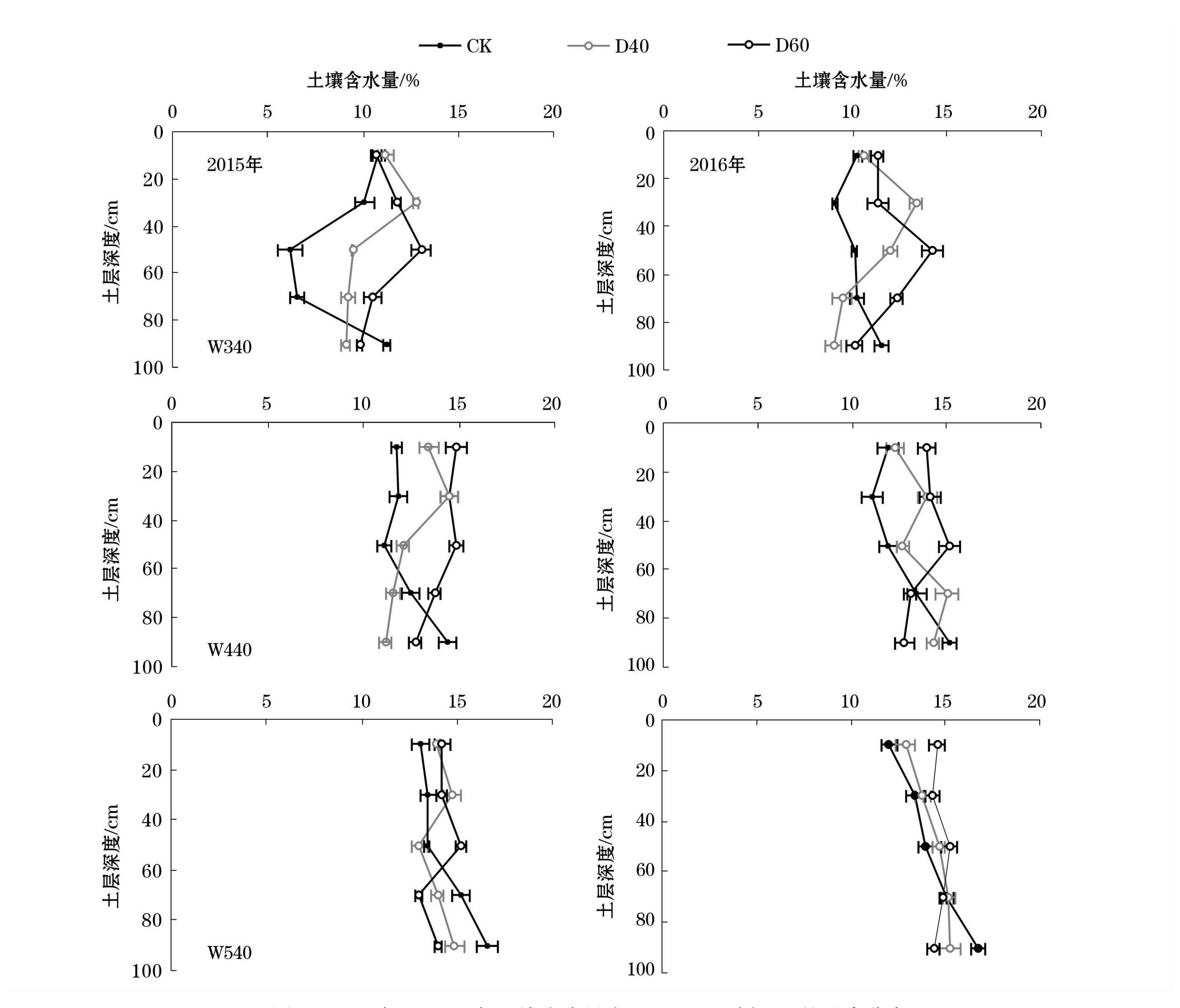


图 3 2015 年和 2016 年土壤含水量在 0 ~ 100 cm 剖面上的垂直分布

Fig. 3 Soil water content in the 0 - 100 cm depth in 2015 and 2016.

2.2 土壤贮水量、渗漏量和蒸散量

土壤净贮水量随灌水量增加显著增加，W540 和 W440 处理土壤净贮水量 2 a 平均较 W340 处理分别增加 24% 和 47%（表 1）。D40 和 D60 处理土壤净贮水量差异不显著，均显著高于 CK，不同灌水量下平均较 CK 分别增加 21% 和 26%。

土壤水分深层渗漏量受灌水量、地下防渗及二者交互作用的影响显著（表 1）。W540 和 W440 处理土壤水分渗漏量平均较 W340 处理分别增加 5.7 倍和 16.3 倍。W340 条件下，D40 和 D60 处理水分渗漏量与 CK 差异不显著（$P > 0.05$）。W440 条件下，D40 和 D60 处理水分渗漏量差异不大，均显著低于 CK，分别减少 64% 和 72%。W540 条件下，水分渗漏量随防渗膜埋深的增加显著降低，D40 和 D60 处理水分渗漏量较 CK 分别减少 39% 和 76%。

蒸散量随着灌水量增加而显著增加，W540 和 W440 处理蒸散量 2 a 平均较 W340 处理分别增加 24.1% 和 12.7%（表 1）。W340 条件下，CK 处理蒸散量显著高于 D40 和 D60 处理。W440 条件下，3 个地下防渗处理间差异较小，仅 2015 年 D40 和 D60 处理蒸散量显著大于 CK。W540 条件下，D40 处理蒸散量较 CK 显著增加（2015 年）或差异不显著（2016 年）；D60 处理蒸散量在 2 a 试验中均显著高于 CK。

2.3 棉花干物质重

增加灌水量显著提高棉花各器官（茎、叶、蕾铃）干重和总干物质重（表 2）。地下防渗对棉花茎干重影响不大，主要影响棉花蕾铃和总干物质重。中、低灌水量下（W440，W340），D40 和 D60 处理棉花蕾铃干重和总干物质重均显著高于 CK 处理；尤

表 1　灌水量和防渗膜埋深对滴灌棉田土壤净贮水量、渗漏量和蒸散量的影响

Tab. 1　The soil water balance as affected by irrigation amount and the depth of the subsurface water retention (SWRT) membrane in 2015 and 2016.

灌水量	防渗膜埋深	2015 年			2016 年		
		净贮水量/mm	渗漏量/mm	蒸散量/mm	净贮水量/mm	渗漏量/mm	蒸散量/mm
W340	CK	-88.7b[a]	5.6a	441a	-95.4b	1.4a	479a
	D40	-75.6a	2.1a	432b	-78.4a	0.9a	462b
	D60	-72.9a	1.8a	429b	-72.7a	1.0a	457b
	平均值 b	-79.1C[c]	3.1B	434C	-82.2C	1.1C	466C
W440	CK	-63.4b	28.5a	490b	-72.9b	23.3a	516a
	D40	-52.1a	7.7b	500a	-64.3a	10.7b	520a
	D60	-52.1a	4.9b	500a	-59.5a	9.2b	517a
	平均值	-55.9B	13.7B	496B	-65.6B	14.4B	518B
W540	CK	-47.1b	54.6a	546c	-53.4b	62.3a	539b
	D40	-35.7a	27.1b	562b	-44.2a	46.3b	546b
	D60	-34.1a	14.4c	573a	-43.6a	13.6c	578a
	平均值	-38.9A	32.0A	550A	-47.1A	40.7A	555A
两因素方差分析(显著性)							
灌水量		* * *	* * *	* * *	* * *	* * *	* * *
防渗膜埋深		* * *	* * *	* * *	* * *	* * *	*
交互作用		ns	* * *	* * *	*	* * *	* * *

注:a 同一列标注不同字母表示在不同防渗膜深度处理间差异显著($P<0.05$);b 同一灌水量处理下的平均值;c 同一列标注不同字母表示在不同灌溉量处理间差异显著($P<0.05$);显著水平:ns, $P\geq0.05$; *, $P<0.05$; * *, $P<0.01$; * * *, $P<0.001$。下同。

其是 W440 下棉花总干物质重随防渗膜埋深的增加而显著增加($P<0.05$),D40 和 D60 处理较 CK 分别增加 16.7% ~17.8% 和 26.2% ~29.5%。高灌水量下(W540),D40 处理对棉花各器官(茎、叶、蕾铃)干重和总干物质重影响不显著;D60 处理棉花蕾铃和总干物质重显著增加,2015 年和 2016 年 D60 处理棉花总干物质重分别较 CK 增加 10.4% 和 14.4%。

2.4　棉花产量

灌水量和地下防渗显著影响棉花单铃重、铃数和籽棉产量(表 3)。W440 和 W540 处理棉花籽棉产量显著高于 W340,分别增加 22.0% 和 28.2%。中、低灌水量下(W440,W340),D40 和 D60 处理棉花结铃数和籽棉产量均显著高于 CK,但 2 个防渗埋深处理(D40 和 D60)间差异较小。高灌水量下(W540),D40 处理对棉花籽棉产量影响不显著($P>0.05$);D60 处理对棉花单铃重影响不显著,单株结铃数和籽棉产量均显著高于 CK。2015 年和 2016 年 D60 处理籽棉产量分别较 CK 增加 10.1% 和 11.6%。

2.5　水分利用率

灌水量、地下防渗及二者交互作用对滴灌棉田水分利用率和灌溉水利用率影响显著(表 4)。总体上,2 a 试验中,W440 处理农田水分利用率均显著

表 2　灌水量和防渗膜埋深对滴灌棉田地上部干物质量的影响

Tab. 2　The aboveground biomass of cotton as affected by irrigation amount and the depth of the subsurface water retention (SWRT) membrane in the 2015 and 2016.

灌水量	地下防渗	生物量/($t\cdot hm^{-2}$)							
		2015 年				2016 年			
		茎	叶	蕾铃	合计	茎	叶	蕾铃	合计
W340	CK	2.54a	1.85a	6.59b	10.98b	2.72a	1.61b	8.68c	13.00c
	D40	2.51a	1.86a	9.32a	13.69a	2.75a	2.42a	11.63b	16.81b
	D60	2.64a	1.93a	9.48a	14.06a	3.14a	2.59a	12.80a	18.53a
	平均值	2.56B	1.84B	8.47B	12.87B	2.87B	2.21B	11.04B	16.11C
W440	CK	3.84a	2.79b	9.64c	16.27c	3.97a	2.82b	9.16c	15.94c
	D40	3.72a	2.91ab	12.50b	18.98b	4.26a	2.92b	11.60b	18.78b
	D60	3.41a	3.32a	13.80a	20.53a	4.32a	3.23a	13.09a	20.64a
	平均值	3.66A	2.96A	11.98A	18.59A	4.18A	2.99A	11.28AB	18.45B
W540	CK	3.62a	2.96b	12.26b	18.83b	4.7a	3.01a	12.52b	20.23b
	D40	3.77a	2.98b	12.32ab	19.07b	4.43a	3.26a	13.41b	21.09b
	D60	4.12a	3.58a	13.09a	20.79a	4.56a	3.34a	15.25a	23.14a
	平均值	3.6A	3.08A	12.79A	19.56A	4.56A	3.20A	13.72A	21.49A
两因素方差分析(显著性)									
灌水量		* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *
防渗膜埋深		ns	*	* *	* *	ns	*	* *	* *
交互作用		ns	ns	* *	* *	ns	ns	*	* *

表 3 灌水量和防渗膜埋深对滴灌棉花产量及其构成因子的影响

Tab. 3 Cotton yield and yield components as affected by irrigation amount and the depth of the subsurface water retention membrane in the 2015 and 2016

灌水量	地下防渗	2015 年 单铃重 /g	2015 年 结铃数 个/株	2015 年 籽棉产量 /(t·hm⁻²)	2016 年 单铃重 /g	2016 年 结铃数 个/株	2016 年 籽棉产量 /(t·hm⁻²)
W340	CK	4.04b	3.99c	3.55b	4.73b	3.70b	3.88b
	D40	4.64a	4.16b	4.24a	4.94a	4.39a	4.82a
	D60	4.67a	4.28a	4.39a	4.97a	4.44a	4.89a
	平均值	4.45B	4.14B	4.06B	4.88B	4.18B	4.53B
W440	CK	4.86a	4.25c	4.54c	5.05b	4.62b	5.18b
	D40	4.91a	4.65b	5.02b	5.13a	5.00a	5.69a
	D60	4.90a	4.93a	5.32a	5.11ab	5.14a	5.84a
	平均值	4.89A	4.61A	4.96A	5.10A	4.92A	5.57A
W540	CK	4.96a	4.55b	4.97b	5.10a	4.89b	5.54b
	D40	5.10a	4.59b	5.15b	5.17a	4.96b	5.69b
	D60	5.10a	4.87a	5.47a	5.18a	5.38a	6.18a
	平均值	5.06A	4.67A	5.20A	5.15A	5.08A	5.81A
两因素方差分析(显著性)							
灌水量		**	***	***	***	***	***
防渗膜埋深		***	***	***	***	***	***
交互作用		***	***	***	*	***	***

表 4 灌水量和地下防渗对滴灌棉田水分利用率及灌溉水利用率的影响

Tab. 4 Water use efficiency and irrigation water use efficiency as affected by irrigation amount and the depth of the subsurface water retention membrane in the 2015 and 2016

灌水量	地下防渗	2015 年 农田水分利用率 /(kg·m⁻³)	2015 年 灌溉水利用率 /(kg·m⁻³)	2016 年 农田水分利用率 /(kg·m⁻³)	2016 年 灌溉水利用率 /(kg·m⁻³)
W340	CK	0.81b	1.21b	0.81b	1.58b
	D40	0.98a	1.44a	1.04a	1.96a
	D60	1.02a	1.49a	1.07a	1.99a
	平均值	0.94B	1.38A	0.97B	1.85A
W440	CK	0.92c	1.14c	1.00b	1.58b
	D40	1.00b	1.27b	1.09a	1.74a
	D60	1.06a	1.34a	1.14a	1.78a
	平均值	0.99A	1.25B	1.08A	1.70B
W540	CK	0.91b	1.01b	1.03b	1.35c
	D40	0.92b	1.05b	1.04ab	1.39b
	D60	0.97a	1.13a	1.07a	1.51a
	平均值	0.93B	1.07C	1.05AB	1.42C
两因素方差分析(显著性)					
灌水量		***	**	***	***
防渗膜埋深		***	**	***	***
交互作用		***	***	***	***

高于 W340 处理,而 W540 与 W340 处理差异不显著。中、低灌水量下(W440,W340),D40 和 D60 处理农田水分利用率差异较小,均显著高于 CK;高灌水量下(W540),D60 处理农田水分利用率最大,D40 和 CK 处理间无显著差异。

灌溉水利用率随灌水量增加而显著降低,W440 和 W540 处理灌溉水利用率较 W340 处理分别减少 9% 和 30%。地下防渗处理对灌溉水利用率的影响与农田水分利用率相似,总体表现为:在中、低灌水量下(W440,W340),D40 和 D60 处理对灌溉水利用率的提高作用差异较小;高灌水量下(W540),D60 处理灌溉水利用率显著高于 D40 和 CK。

2.6 经济效益分析

利润随灌水量增加显著增加,W540 和 W440 处理利润 2 a 平均较 W340 处理分别增加 273% 和 227%(表 5)。地下防渗 D40 和 D60 处理较 CK 处理平均每年利润增加 3871 元·hm⁻²。中、低灌水量下(W440,W340),D40 和 D60 处理利润显著高于 CK,但 2 个防渗埋深处理(D40 和 D60)间差异较小。高灌水量下(W540),D40 处理对利润影响不显著($P>0.05$);D60 处理利润显著高于 CK。2015 年和 2016 年 D60 处理利润分别较 CK 增加 6% ~9% 和 10% ~12%。

3 讨论

土壤含水量是干旱区灌溉农田水分管理的重要参数,直接影响作物生长和产量[17-18]。本研究表明地下防渗处理(D40 和 D60)可显著增加 0 ~60 cm 土壤含水量,Kavdir 等[9]、Smucker[10] 等研究也发现,在根区铺设防渗膜增加根区土壤含水量,原因主要是地下防渗膜通过截断土壤毛细管,改变土壤水分运移和分布,增加土壤保水性[19-20]。地下防渗处理对土壤含水量的影响与灌水量和地下防渗膜埋深密切相关。低灌水量(340 mm)条件下,土壤含水量主要分布在 0 ~60 cm 土层,地下防渗处理增加 20 ~60 cm 土壤含水量。随着灌水量的增加,对照处理(CK)土壤水分向下运移趋势明显,在底层(80 ~100 cm)土壤含水量高于防渗膜处理(D40 和 D60)。

土壤水分深层渗漏是农田水分损失的重要途径之一,而过量灌溉是导致农田土壤水分深层渗漏损失增加的主要原因。有研究表明农田土壤贮水量和水分渗漏量随着灌水量的增加而显著增加[21]。本

表 5　2015 年和 2016 年不同处理棉花经济效益分析

Tab. 5　Economic benefits analysis from different treatments in the 2015 and 2016

灌水量	地下防渗	成本/(元·hm^{-2})				产值[d]/(元·hm^{-2})		利润/(元·hm^{2})	
		防渗膜[a]	机械铺膜[b]	其他成本[c]	合计	2015 年	2016 年	2015 年	2016 年
W340	CK	0	0	28200	28200	27131	28893	-1069b	693b
	D40	833	113	28200	29146	32420	35854	3274a	6708a
	D60	833	169	28200	29202	33549	36395	4347a	7193a
	平均值					2184C	4865C		
W440	CK	0	0	28500	28500	34678	38547	6178c	10047b
	D40	833	113	28500	29446	38375	42360	8929b	12914a
	D60	833	169	28500	29502	40627	43430	11125a	13928a
	平均值					8744B	12296B		
W540	CK	0	0	28900	28900	37976	41195	9076b	12295b
	D40	833	113	28900	29846	39370	42360	9524b	12514b
	D60	833	169	28900	29902	41799	46036	11897a	16134a
	平均值					10166A	13648A		

注:防渗膜[a] 成本:防渗膜单价为 1.0 元·m^{-2},防渗膜一次投入可使用 8~10 a,每年防渗膜[a] 成本按照 8 a 分期折算;机械铺膜[b] 成本:埋深 40 cm(D40)机械铺设成本为 900 元·hm^{-2},埋深 60 cm(D60)机械铺设成本为 1 350 元·hm^{-2};每年机械铺膜成本按照 8 a 分期折算;其他成本[c]:包括滴灌带、地膜、种子、化肥、农药、水电、土地费、人工管理、机械作业、采收(机采)等成本,具体参照文献〔15,16〕;产值[d]:按照棉花产量和当年棉花平均价格计算。

研究中,低灌水量(340 mm)条件下滴灌棉田水分渗漏量很少;随着灌水量的增加,土壤水分渗漏量显著增加。D40 和 D60 可显著增加土壤净贮水量,减少水分渗漏量。Kavdir 等〔9〕的研究结果也指出,在 30 cm 和 40 cm 深处铺设防渗膜较无防渗膜处理能增加土壤贮水量。本研究发现滴灌棉田土壤水分渗漏量受灌水量、地下防渗膜埋深及二者交互作用影响显著。低灌水量(340 mm)条件下,地下防渗处理对土壤水分渗漏量无显著影响;中灌水量(440 mm)条件下,地下防渗可显著降低土壤水分渗漏量,但 D40 和 D60 处理间差异不显著;高灌水量(540 mm)条件下,水分渗漏量随防渗膜埋深的增加显著降低。表明随灌水量增加土壤含水量增加,土壤含水量达到饱和从而发生渗漏,地下防渗阻碍部分土壤水分向下运移,地下防渗增加防渗膜铺设以上土层土壤含水量,从而降低土壤水分渗漏量。灌水量过高,地下防渗埋深 60 cm 减少渗漏量优于埋深 40 cm。

农田蒸散量是农田水分平衡的主要支出项,可表征农田的实际耗水量。本研究中膜下滴灌棉田蒸散量为 429~578 mm,且随灌水量的增加显著增加;Yang 等〔22〕在相近地区研究结果指出,滴灌棉田蒸散量为 393~689 mm,随灌水量的增加显著增加。本研究发现,灌水量和地下防渗膜埋深对滴灌棉田蒸散量存在显著的交互作用影响。W340 条件下,无防渗处理(CK)蒸散量最大,显著高于 D40 和 D60 处理;W440 条件下,不同处理间差异较小;W540 条件下,D60 处理蒸散量显著高于 D40 和 CK 处理。这可能是由于,低灌水量处理(340 mm)根区土壤水分不足,致使根区下层水分耗散增加;而地下防渗处理阻隔下层土壤水分向上运移,导致农田蒸散量降低〔13〕。中、高灌水量(440、540 mm)条件下,地下防渗处理尤其是 D60 处理显著减少土壤水分深层渗漏,增加根区土壤含水量,促进作物生长,导致农田蒸散量显著增加〔23-24〕。

本研究表明,增加灌水量可促进棉花干物质积累,显著提高棉花籽棉产量,但 W440 处理棉花产量与 W540 处理差异不显著;这与 Liu 等〔25〕、闫曼曼等〔26〕的研究结果相似。也有研究表明棉花产量在一定范围内随土壤水势的增加而增加,达到 -30 kPa 后,籽棉产量随土壤水势的增加而减少〔27〕。本研究发现,在中、低灌水量条件下,D40 和 D60 处理均显著增加棉花蕾铃干物质重和棉花结铃数,从而导致籽棉产量增加;在高灌水量条件下,D60 处理显著增加棉花干物质重和产量,而 D40 处理与 CK 无显著差异。低灌水量(340 mm)条件下,地下防渗增加 20~40 cm 土层土壤贮水量,减少无效蒸散,有利于棉花蕾铃干物质积累,增加铃重和结铃数,从而增加棉花产量。高灌水量(540 mm)条件下,地下防渗

减少土壤水分深层渗漏,促进作物蒸腾,从而促进作物生长和提高产量[9,28]。

地下防渗可显著提高农田水分利用效率[29]。低灌水量条件下(340 mm),D40 和 D60 处理农田水分利用率、灌溉水利用率和纯收入均显著高于 CK。由于铺设防渗膜减少土壤贮水量变化量和无效蒸散量,作物产量增加,从而提高水分利用效率。中、低灌水量条件下(440 mm),2 a 试验不同埋深处理间农田水分利用率、灌溉水利用和纯收入差异较大,可能是由于 2015 年棉花生育期降水量少和出现极端气温(苗期连续低温,花铃期连续高温)导致棉花减产。高灌水量条件(540 mm)下,D60 处理农田水分利用率、灌溉水利用率和净利润显著高于 CK,而 D40 处理提高水分利用率作用不大。灌水量过高,一方面表层土壤含水量达到饱和,防渗膜铺设在 40 cm 处渗漏损失增加,Guber 等[13]研究也发现过量灌溉会导致地下防渗漏性能降低。另一方面,CK 处理土壤含水量与 D40 处理差异较小,从而 D40 处理对棉花生长和产量影响不显著。

4 结 论

地下防渗(埋深 40,60 cm)可显著提高滴灌棉田 0~60 cm 土壤含水量和净贮水量。增加灌水量会显著增加滴灌棉田土壤水分深层渗漏损失量。低灌水量下(340 mm),地下防渗(埋深 40,60 cm)对土壤水分深层渗漏量影响不显著;中、高灌水量下(440,540 mm),地下防渗显著降低土壤水分深层渗漏损失量。地下防渗(埋深 40,60 cm)显著减少了低灌水量下(340 mm)的棉田蒸散量,而地下防渗埋深 60 cm 则显著增加了高灌水量下(540 mm)的棉田蒸散量。中、低灌水量下(440,340 mm),地下防渗埋深 40 cm 和 60 cm 处理棉花干物质重、产量、水分利用率和经济效益均显著高于对照,但 2 个不同防渗膜埋深处理间差异不显著。高灌水量下(540 mm),地下防渗埋深 60 cm 显著提高棉花干物质重、产量、水分利用率和经济效益,而地下防渗埋深 40 cm 与对照无显著差异。因此,中、低灌水量下(340,440 mm),地下防渗埋深 40 cm 或 60 cm 均较适宜;而高灌水量下(540 mm),采用地下防渗埋深 60 cm 较为适合。

参考文献(References):

〔1〕 邓铭江,石泉. 内陆干旱区水资源管理调控模式〔J〕. 地球科学进展,2014,24(9):1 046 – 1 054.〔Deng Mingjiang,Shi Quan. Management and regulation pattern of water resource in inland arid region〔J〕. Advances in Earth Science. 2014,24(9):1 046 – 1 054.〕

〔2〕 孔庆平. 制约新疆棉花生产发展的关键因素分析与应对策略探讨〔J〕. 新疆农业科学,2010,47(增刊 2):3 – 5.〔Kong Qingping. Analysis on the key factor of inhibiting cotton production development and discussion on its tacties〔J〕. Xinjiang Agricultural Sciences. 2010,47(Suppl. 2):3 – 5.〕

〔3〕 陈亚宁,杨青,罗毅,等. 西北干旱区水资源问题研究思考〔J〕. 干旱区地理,2012,35(1):1 – 9.〔Chen Yaning,Yang Qing,Luo Yi,et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of Northwest China〔J〕. Arid Land Geography. 2012,35(1):1 – 9.〕

〔4〕 王永静,闫周府. 新疆玛纳斯河流域用水结构演变及其驱动力分析〔J〕. 干旱区研究,2017,34(2):243 – 250.〔Wang Yongjing Yan Zhoufu. Evolution and driving forces of water consumption structure in the Manas river basin in Xinjiang〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(2):243 – 250.〕

〔5〕 孙林,罗毅,杨传,杰,等. 干旱区滴灌棉田灌水量与灌溉周期关系〔J〕. 资源科学,2012,34(4):668 – 676.〔Sun Lin,Luo Yi,Yang Chuanjie,et al. Relationships among drip irrigation amount,irrigation interval and deep percolation:A case study on Manas river oasis,Xinjiang〔J〕. Resources Science. 2012,34(4):668 – 676.〕

〔6〕 杨梦娇,吕新,侯振安,等. 滴灌施肥条件下不同土层硝态氮的分布规律〔J〕. 新疆农业科学,2013,50(5):875 – 881.〔Yang Mengjiao,Lv Xin,Hou Zhen'an,et al. Distribution of nitrate nitrogen in different soil layers under drip fertigation〔J〕. Xinjiang Agricultural Sciences,2013,50(5):875 – 881.〕

〔7〕 马丽娟,侯振安,闵伟,等. 适宜咸水滴灌提高棉花水氮利用率〔J〕. 农业工程学报,2013,29(14):130 – 138.〔Ma Lijuan,Hou Zhen'an,Min Wei,et al. Drip irrigation with suitable saline water improves water use efficiency for cotton〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(14):130 – 138.〕

〔8〕 刘梅先,杨劲松,李晓明,等. 膜下滴灌条件下滴水量和滴水频率对棉田土壤水分分布及水分利用效率的影响〔J〕. 应用生态学报,2011,22(12):3 203 – 3 210.〔Liu Meixian,Yang Jingsong,Li Xiaoming,et al. Effects of irrigation amount and frequency on soil water distribution and water use efficiency in a cotton field under mulched drip irrigation〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology. 2011,22(12):3 203 – 3 210.〕

〔9〕 Kavdir Y,Zhang W,Basso B,et al. Development of a new long – term drought resilient soil water retention technology〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2014,69(5):154A – 160A.

〔10〕 Churchman G J,Landa E R. The Soil Underfoot:infinite possibilities for a finite resource〔M〕//Smucker A J M,Basso B. Global

potential for a new subsurface water retention technology – converting marginal soil into sustainable plant production, Florida: CRC Press, 2014: 315 – 324.

〔11〕 王振华,杨培岭,郑旭荣,等. 新疆现行灌溉制度下膜下滴灌棉田土壤盐分分布变化〔J〕. 农业机械学报,2014,45(8):149 – 159.〔Wang Zhenhua, Yang Peiling, Zheng Xurong, et al. Soil salt dynamics in cotton fields with mulched drip irrigation under the existing irrigation system in Xinjiang〔J〕. Journal of Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 149 – 159.〕

〔12〕 闵伟. 咸水滴灌对棉田土壤微生物及水氮利用效率的影响〔D〕. 新疆:石河子大学,2015.〔Min Wei. Effect of Saline Water on Soil Microbe and Water – and Nitrogen – use Efficiency in Drip – irrigated Cotton Field〔D〕. Xinjiang: Shihezi University, 2015.〕

〔13〕 Guber A K, Smucker A J M, Berhanu S, et al. Subsurface water retention technology improves root zone water storage for corn production on coarse – textured soils〔J〕. Vadose Zone Journal, 2015, 14(7): 1 – 13.

〔14〕 Ibragimov N, Evett S R, Esanbekov Y, et al. Water use efficiency of irrigated cotton in Uzbekistan under drip and furrow irrigation〔J〕. Agricultural Water Management, 2007, 90(1): 112 – 120.

〔15〕 宁松瑞,左强,石建初,等. 新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益〔J〕. 农业工程学报,2013,29(22):90 – 99.〔Ning Songrui, Zuo Qiang, Shi Jianchu, et al. Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip – irrigated cotton under film in Xinjiang〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(22): 90 – 99.〕

〔16〕 赵波,范文波,刘圣凡,等. 兵团南北疆膜下滴灌棉花经济效益调查与分析——以农 1、2、5、8 师为例〔J〕. 中国农村水利水电,2014(7):41 – 43.〔Zhao Bo, Fan Wenbo, Liu Shengfan, et al. Investigation and analysis of the economic benefits of cotton with drip irrigation under film south Xinjiang corps〔J〕. China Rural Water and Hydropower, 2014(7): 41 – 43.〕

〔17〕 Singh Y, Rao S S, Regar P L. Deficit irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response factor in shallow soils of semi – arid environment〔J〕. Agricultural Water Management, 2010, 97(7): 965 – 970.

〔18〕 王娟,江天才,万素梅. 水分胁迫下间作棉田土壤水分及产量分析〔J〕. 干旱区研究,2016,33(1):89 – 93.〔Wang Juan, Jiang Tiancai, Wan Sumei. Analysis on the soil moisture and yield under water stress for an intercropping field of cotton〔J〕. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 89 – 93.〕

〔19〕 Demirel K, Kavd? r Y. Effect of soil water retention barriers on turfgrass growth and soil water content〔J〕. Irrigation Science, 2013, 31(4): 689 – 700.

〔20〕 Amirpour M, Shorafa M, Gorji M, et al. Effect of subsurface water retention using polyethylene membranes with surface mulch and irrigation on moisture, temperature and salinity of sandy soil of an arid region in Iran〔J〕. Advances in Environmental Sciences, 2016, 8(1): 33 – 41.

〔21〕 Li X, Jin M, Zhou N, et al. Evaluation of evapotranspiration and deep percolation under mulched drip irrigation in an oasis of Tarim Basin, China〔J〕. Journal of Hydrology, 2016, 538: 677 – 688.

〔22〕 Yang P, Hu H, Tian F, Zhang Z, Dai C. Crop coefficient for cotton under plastic mulch and drip irrigation based on eddy covariance observation in an arid area of Northwestern China〔J〕. Agricultural Water Management, 2016, 171: 21 – 30.

〔23〕 ünlü M, Kanber R, Ko? D L, et al. Effects of deficit irrigation on the yield and yield components of drip irrigated cotton in a mediterranean environment〔J〕. Agricultural Water Management, 2011, 98(4): 597 – 605.

〔24〕 Yang Chuanjie, Luo Yi, Sun Lin. Effect of deficit irrigation on the growth, water use characteristics and yield of cotton in arid Northwest China〔J〕. Pedosphere, 2015, 25(6): 910 – 924.

〔25〕 Liu H, Gao Y, Sun J, et al. Responses of yield, water use efficiency and quality of short – season cotton to irrigation management: interactive effects of irrigation methods and deficit irrigation〔J〕. Irrigation Science, 2017, 35(2): 125 – 139.

〔26〕 闫曼曼,郑剑超,张巨松,等. 调亏灌溉对海岛棉光合物质生产与分配的影响〔J〕. 干旱区研究,2016,33(6):1 351 – 1 357.〔Yan Manman, Zheng Jianchao, Zhang Jusong, et al. Effects of regulated deficit irrigation on production and distribution of photosynthetic matter in gossypium barbadense L〔J〕. Arid Zone Research, 2016, 33(6): 1 351 – 1 357.〕

〔27〕 Kang Y, Wang R, Wan S, et al. Effects of different water levels on cotton growth and water use through drip irrigation in an arid region with saline ground water of Northwest China〔J〕. Agricultural water management, 2012, 109: 117 – 126.〔28〕 Demirel K, Kavd? r Y. Effect of soil water retention barriers on turfgrass growth and soil water content〔J〕. Irrigation Science, 2013, 31(4): 689 – 700.

〔29〕 Smucker A J M, Yang Z, Guber A K, et al. A new revolutionary technology to feed billions by establishing sustainable agriculture on small and large landscapes including urban regions globally〔J〕. International Journal of Development Research, 2016, 6(10): 9 596 – 9 602.

Effects of subsurface water retention technology on yield and water use efficiency of cotton under drip – irrigation conditions

HU Zhi – qiang, HOU Zhen – an, MIN Wei, YE Jun, WU Yan

(*Department of Resources and Environmental Science, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang* 832003, *China*)

Abstract: Over – irrigation leads to deep percolation, which is one of the main pathways of water loss from drip irrigation field. Subsurface water retention technology (SWRT) can effectively reduce the deep percolation and improve the water use efficiency. The objective of this study was to determine the effects of irrigation amount and SWRT on soil water balance, cotton yield and water use efficiency in a drip – irrigated cotton field. The experimental design was a 3 × 3 factorial with three levels of irrigation amounts (340, 440, and 540 mm) and three SWRT treatments (control, 40 cm – deep membrane, and 60 cm – deep membrane). Results showed that the treatments of 40 cm – or 60 cm – deep membrane significant increased soil water content (0 – 60 cm) and net soil water storage compared with control. Water deep percolation losses below 1 – m depth increased significantly as irrigation amount increased. In the 340 mm plots, there was no significant difference in water deep percolation losses among three SWRT treatments. In the 440, 540 mm plots, water deep percolation losses were by 64%, 38% less in the 40 cm – deep membrane treatment and 72%, 76% less in the 60 cm – deep membrane treatment compared with the control. The treatments of 40 cm – or 60 cm – deep membrane both significantly reduced evapotranspiration in the 340 mm plots. However, in the 540 mm plots, the 60 cm – deep membrane treatment significantly increased evapotranspiration compared with the control. In the 340 and 440 mm plots, dry matter weight, yield, water use efficiency, and economic benefits of cotton were significantly higher in the 40 cm – or 60 cm – deep membrane treatments than in the control. But there were no significant differences between the 40 cm – deep membrane and 60 cm – deep membrane treatments. In the 540 mm plots, the 60 cm – deep membrane treatment significantly increased cotton yield, water use efficiency, and economic benefits. There were no significant differences between the 40 cm – deep membrane and control. Therefore, the SWRT of 40 cm – or 60 cm – deep membranes are both suitable under low – moderate irrigation amount levels (340, 440 mm), and the SWRT of 60 cm – deep membrane is preferable under high irrigation amount (540 mm).

Key words: Drip irrigation; subsurface water retention technology; irrigation amount; cotton yield; water use efficiency